

PWRのSA対策の概要（考え方、設備）

2022年3月16日
九州電力株式会社
松田 弘毅

I. 重大事故等への対処に係る措置の有効性評価の流れ

I-① 評価事故シーケンスの選定

I-② 評価事故シーケンスにおける有効性評価

II. 具体的な評価内容（「水素燃焼」の例）

II-① 設備要求

II-② 判断基準

II-③ 想定する事故シーケンス

II-④ 評価内容

II-⑤ 不確かさを踏まえた感度解析

III. まとめ

I-① 評価事故シーケンスの選定

確率論的リスク評価（PRA）※の知見を活用し、炉心損傷防止対策の有効性評価を行うための重要事故シーケンス及び格納容器破損防止対策の有効性評価を行うための評価事故シーケンスを選定。

※：新規制基準適合審査においては、設計基準対象施設にのみ期待する「裸のPRA」を実施

評価事故シーケンス選定の概要（格納容器破損防止対策）

- ・ 内部事象レベル1.5PRA及び外部事象に係る定性的な検討を行い、「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」（以下「設置許可基準規則の解釈」という。）を踏まえ、格納容器破損防止対策の有効性評価を行う格納容器破損モードを選定。
- ・ 格納容器破損モード毎に格納容器破損モード発生の観点で厳しいプラント損傷状態（PDS）を選定し、その中で厳しい事故シーケンスを格納容器破損防止対策の有効性評価の評価事故シーケンスとして選定。

設置許可基準規則の解釈 第37条（重大事故等の拡大防止等）

2-1

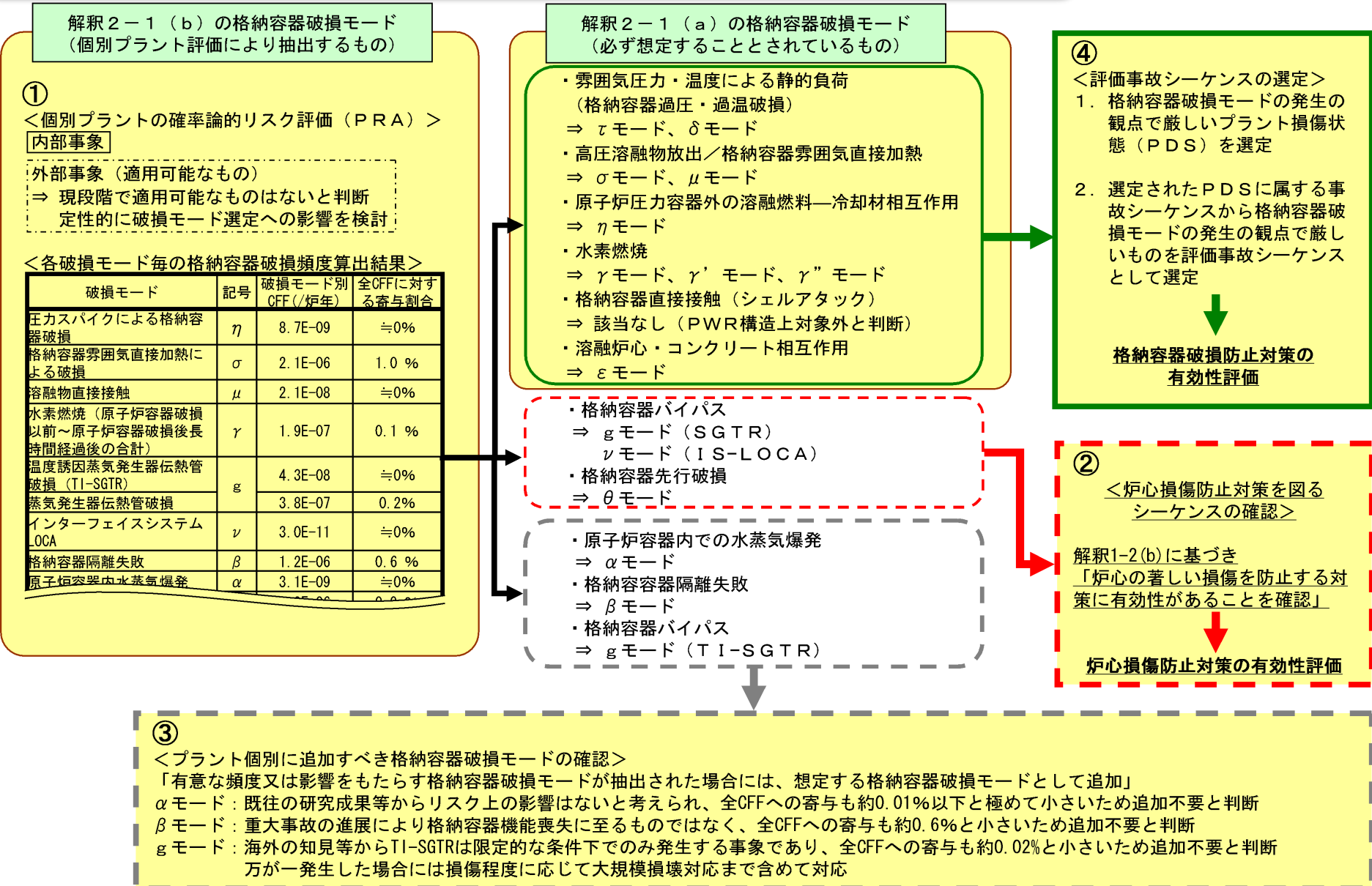
重大事故が発生した場合において想定する格納容器破損モードは、以下の(a)及び(b)の格納容器破損モードとする。

(a) 必ず想定する格納容器破損モード

- ・ 雰囲気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）
- ・ 原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用
- ・ 格納容器直接接触（シェルアタック）
- ・ 高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱
- ・ 水素燃焼
- ・ 溶融炉心・コンクリート相互作用

(b) 個別プラント評価により抽出した格納容器破損モード

I-① 評価事故シーケンスの選定 (川内 格納容器破損防止対策の例)



③
 <プラント個別に追加すべき格納容器破損モードの確認>
 「有意な頻度又は影響をもたらす格納容器破損モードが抽出された場合には、想定する格納容器破損モードとして追加」
 α モード：既往の研究成果等からリスク上の影響はないと考えられ、全CFFへの寄与も約0.01%以下と極めて小さいため追加不要と判断
 β モード：重大事故の進展により格納容器機能喪失に至るものではなく、全CFFへの寄与も約0.6%と小さいため追加不要と判断
 gモード：海外の知見等からTI-SGTRは限定的な条件下でのみ発生する事象であり、全CFFへの寄与も約0.02%と小さいため追加不要と判断
 万が一発生した場合には損傷程度に応じて大規模損壊対応まで含めて対応

I-② 評価事故シーケンスにおける有効性評価

PRAの結果を踏まえた評価事故シーケンスについて、重大事故等に対処するための設備、手順及び体制を整備した上で、解析コードによる解析等を踏まえて、対応する措置の有効性を評価。

解析条件設定の方針

- ・ 事象進展の不確かさを考慮して、設計値等の現実的な条件を基本としつつ、原則、有効性を確認するための評価項目となるパラメータに対して余裕が小さくなるような条件を設定。
- ・ 一部、評価項目となるパラメータに対し有意な影響を及ぼさないことを踏まえて標準的なプラント設計情報に基づいた条件も組み合わせて設定。

不確かさに関する取扱い

- ・ 解析コードの持つ重要現象に対する不確かさや解析条件の不確かさによって有効性評価の評価項目となるパラメータ及び運転員等操作時間に対する余裕が小さくなる可能性がある場合は、感度解析等を行い影響を確認。

評価の実施

- ・ 上記条件で評価を実施し、「設置許可基準規則の解釈 第37条（重大事故等の拡大防止等）」の判断基準を満足することを確認。

II-① 設備要求

設置許可基準規則 第52条（水素爆発による原子炉格納容器の破損を防止するための設備）

発電用原子炉施設には、炉心の著しい損傷が発生した場合において原子炉格納容器内における水素による爆発（以下「水素爆発」という。）による破損を防止する必要がある場合には、水素爆発による原子炉格納容器の破損を防止するために必要な設備を設けなければならない。

II-② 判断基準

設置許可基準規則の解釈 第37条（重大事故等の拡大防止等）

2-3

(f) 原子炉格納容器が破損する可能性のある水素の爆轟を防止すること

2-4

上記2-3 (f) の「原子炉格納容器が破損する可能性のある水素の爆轟を防止すること」とは、以下の要件を満たすこと。

(a) 原子炉格納容器内の水素濃度がドライ条件に換算して13vol%以下又は酸素濃度が5vol%以下であること

II-③ 想定する評価事故シーケンス（川内）

I-①に基づき格納容器破損シーケンスの中で水素燃焼の観点から厳しいシーケンスを選定。

- a. 水素燃焼の格納容器破損モードに含まれるPDSのうち、事象進展が早く初期から原子炉格納容器内への水素放出が開始され、原子炉容器破損が早い、大中破断LOCAである「A**」が水素放出速度の観点で厳しい。
- b. 格納容器スプレイ作動による水蒸気凝縮に伴い、相対的に水素濃度が上昇することから、原子炉格納容器内注水があり除熱ができていない「**I」がより厳しい
- c. したがって最も厳しいPDSは破断規模が大きく格納容器スプレイが作動する「AEI」となる。
- d. 「AEI」に属する事故シーケンスのうち、中破断LOCAに比べ破断口径が大きく、事象進展が早くなり、初期から水素が放出され、かつ、放出速度が大きくなる大破断LOCAを起因とし、さらに余裕時間及び要求される設備容量の観点から厳しくなる低圧注入機能及び高圧注入機能の喪失も考慮した「大LOCA+高圧注入失敗+低圧注入失敗」を評価事故シーケンスとして選定。

格納容器破損モード	最も厳しいPDS	事故シーケンス	最も厳しい事故シーケンス	評価事故シーケンス
水素燃焼	AEI	<ul style="list-style-type: none"> ・ 中LOCA+高圧注入失敗 ・ 中LOCA+高圧再循環失敗 ・ 大LOCA+低圧注入失敗 ・ 大LOCA+低圧再循環失敗 ・ 中LOCA+低圧再循環失敗 ・ 中LOCA+蓄圧注入失敗 ・ 大LOCA+蓄圧注入失敗 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 大LOCA+低圧注入失敗 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 大LOCA+高圧注入失敗+低圧注入失敗 (事象進展が厳しくなるよう高圧注入系の失敗を考慮)

【参考】プラント損傷状態（PDS）の分類記号

事故のタイプと1次系圧力	
分類記号	状態の説明
A	1次系の破断口径が大きく、低圧状態で炉心損傷に至るもの (起因事象：大中破断LOCA)
S	1次系の破断口径が小さく、中圧状態で炉心損傷に至るもの (起因事象：小破断LOCA)
T	過渡事象が起因となり、高圧状態で炉心損傷に至るもの (起因事象：過渡事象)
G	格納容器バイパスで中圧状態のもの (起因事象：蒸気発生器伝熱管破損)
V	格納容器バイパスで低圧状態のもの (起因事象：インターフェイスシステムLOCA)

炉心損傷時期	
分類記号	状態の説明
E	事象発生から短時間で炉心損傷に至るもの
L	事象発生から長時間で炉心損傷に至るもの

原子炉格納容器内事故進展（原子炉格納容器破損時期、溶融炉心の冷却手段）	
分類記号	状態の説明
D	ECCSやCVスプレイ系によるCV内注水がなく、溶融炉心の冷却が達成できない可能性があるもの CV内除熱が行われていない状態で、炉心損傷後にCV破損に至る可能性があるもの
W	ECCSやCVスプレイ系によるCV内注水があり、溶融炉心の冷却が達成できる可能性があるもの CV内除熱が行われていない状態で、炉心損傷後にCV破損に至る可能性があるもの
I	ECCSやCVスプレイ系によるCV内注水があり、溶融炉心の冷却が達成できない可能性があるもの CV内除熱が行われている状態で、炉心損傷後にCV破損に至る可能性があるもの
C	ECCSやCVスプレイ系によるCV内注水があり、溶融炉心の冷却が達成できる可能性があるもの CV内除熱が行われていない状態で、CV破損後に炉心損傷に至る可能性があるもの

II-④ 評価内容

○水素濃度評価の流れ

MAAP

- ・ 1次系内の各種事故事象（炉心溶融進展、**水素発生**、放射性物質放出など）
- ・ CV内の放射性物質分布、**溶融炉心の挙動**

感度解析（2）

水素発生量の不確かさ（全炉心内のZr量の100%が水と反応）

感度解析（1）

溶融炉心・コンクリート相互作用（MCCI）の不確かさ

主な解析結果

- ・ 1次系からCVへの水素の放出量
- ・ RV外のZr-水反応による水素の生成量

主な解析結果

- ・ 1次系からCVへの水、水蒸気の放出量
- ・ C/V内の放射性物質の分布
- ・ C/V内での溶融炉心に係る挙動（発熱量）

主な解析結果

- ・ CV内水位・水温など
- ・ CV内の放射性物質の分布

水素生成量を補正*

放射線水分解等評価

- ・ 放射線水分解による水素生成

水素生成のG値

炉心水	0.4分子/100eV
サンプル水	0.3分子/100eV

- ・ 金属腐食による水素生成

主な解析結果

- ・ 1次系からCVへの水素の放出量（補正後）
- ・ RV外のZr-水反応による水素の生成量（補正後）

Zr-水反応割合の補正方法（次頁参照）

感度解析（3）

CV内の水素混合に関する不確かさ（イグナイトの追加設置）

主な解析結果

- ・ 放射線水分解による水素生成量
- ・ 金属腐食による水素生成量

GOTHIC

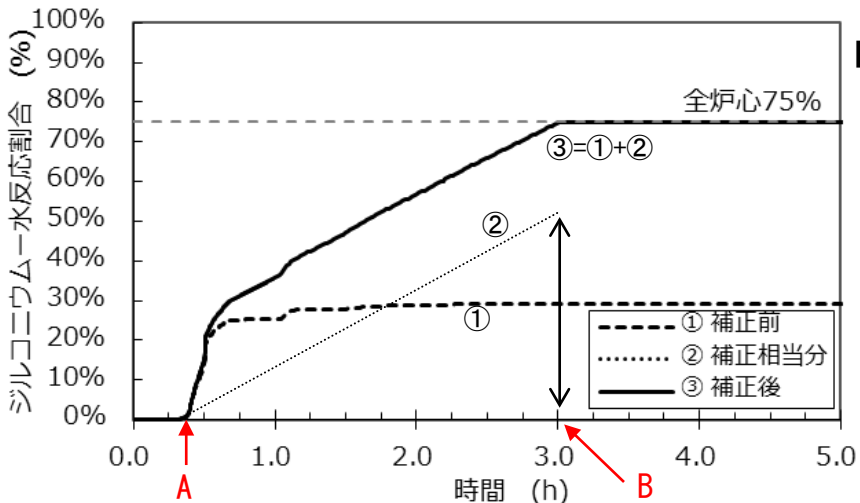
- ・ CV内の水素混合気の挙動
- ・ PARによる水素処理挙動

主な解析結果

- ・ CV内の圧力・温度など
- ・ CVの各区画内の各種気体成分の濃度

※ 発電用原子炉に係る炉心損傷防止対策及び格納容器破損防止対策の有効性評価に関する審査ガイド（以下「審査ガイド」という。）に基づき、原子炉容器下部が破損するまでに、全炉心内のZr量の75%が水と反応するように補正。

OGOTHICに入力するZr-水反応割合の補正方法

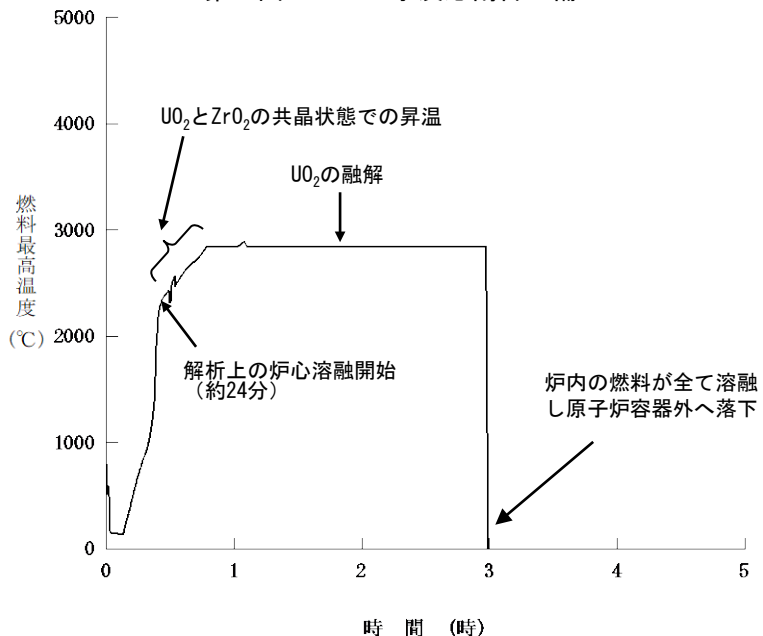


第1図 Zr-水反応割合の補正

- 「大LOCA+高圧注入失敗+低圧注入失敗」時のZr-水反応割合をMAAPにて評価。（第1図の①）
- ・ 事象発生後、炉心内の水が急激に減少し燃料の露出が開始すると燃料被覆管温度が上昇してZr-水反応が促進。
- ・ さらに燃料被覆管温度が上昇し、炉心溶融が開始（A点：約24分）する時点からは、Zr-水反応が顕著となり急激に反応割合が増加。
- ・ 約1時間で原子炉容器下部ヘッドへの溶融炉心の落下に伴い水素が発生。
- ・ 約1.3時間で原子炉容器が破損し、約3時間（B点）で全ての溶融炉心が原子炉容器外へ落下して原子炉下部キャビティ水により冷却されると、Zr-水反応による水素の生成はほぼ停止。
- ・ Zr-水反応による水素生成がほぼ停止した時点での割合は約30%。

■ MAAPの評価結果に基づき、審査ガイドで規定されている原子炉容器が破損した時点でのZr-水反応量を75%に補正する方法について検討。

- ・ Zr-水反応により水素が発生する期間は、溶融炉心が炉内に存在している間であるため、補正する期間はZr-水反応が顕著となる約24分から、停止する約3時間までとする。
- ・ さらに、差分（75%－30%）は約24分から約3時間まで一定速度で増加すると仮定。（第1図の②）



第2図 燃料最高温度の推移（MAAP）

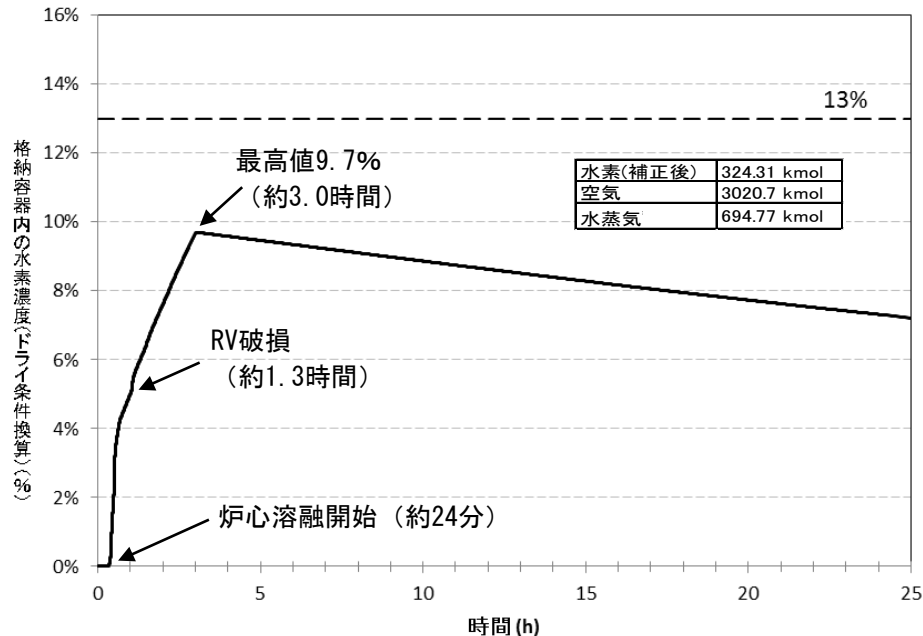
II. 具体的な評価内容（「水素燃焼」の例）

○静的触媒式水素再結合装置（PAR）の設置場所

- ・原子炉格納容器上部ドーム部では原子炉格納容器内で発生する水素が自然循環対流により流動するため、より効率的な水素除去ができるよう原子炉格納容器上部にPAR 4台を分散配置。
- ・また、原子炉格納容器下部において水素が発生することから、水素の流路と想定される原子炉格納容器下部の開口部付近にも1台設置。
- ・GOTHICにおける原子炉格納容器内のノード分割を踏まえ、上記配置に対応したノードにおいてPARによる水素除去が行われるようにモデル化して水素濃度評価を実施。

○解析結果

第3図に示すとおり格納容器自由体積が大きいいため、Zr-水反応によって発生する水素の濃度は限定され、水素爆轟の目安となる格納容器内ドライ換算水素濃度が13vol%に到達することはない。また、水の放射線分解等によって長期的に発生する水素については、PARの効果により減少する。



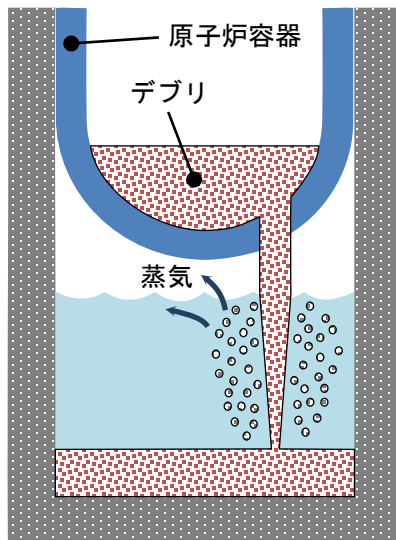
第3図 格納容器内の全体平均水素濃度の推移（GOTHIC）〔全炉心Zr75%反応、PAR5台〕

II-⑤ 不確かさを踏まえた感度解析

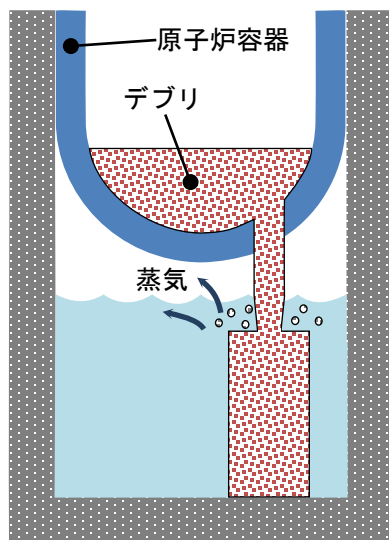
(1) 溶融炉心・コンクリート相互作用（MCCI）の不確かさ

MCCIの影響については評価事故シーケンス「大破断LOCA+ECCS注入失敗+格納容器スプレイ注入失敗」時に原子炉下部キャビティ部に溶融炉心が一様に拡がるとして評価している。（ベースケース）

さらに、溶融炉心の拡がりの不確かさを考慮し、局所的に溶融炉心が堆積するような条件でコンクリート侵食が発生した場合のMCCIによる影響を確認している。（感度解析ケース）



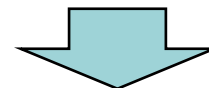
ベースケース



感度解析ケース

〔感度解析ケースの結果〕

- ・コンクリート侵食は約19cm（ベースケースでは有意な侵食なし）となり水素が発生するが、コンクリート侵食の停止に伴い水素発生も停止。
- ・MCCIによる水素発生量は Z_r に起因するものであり全炉心内の Z_r 量の約6%が反応。

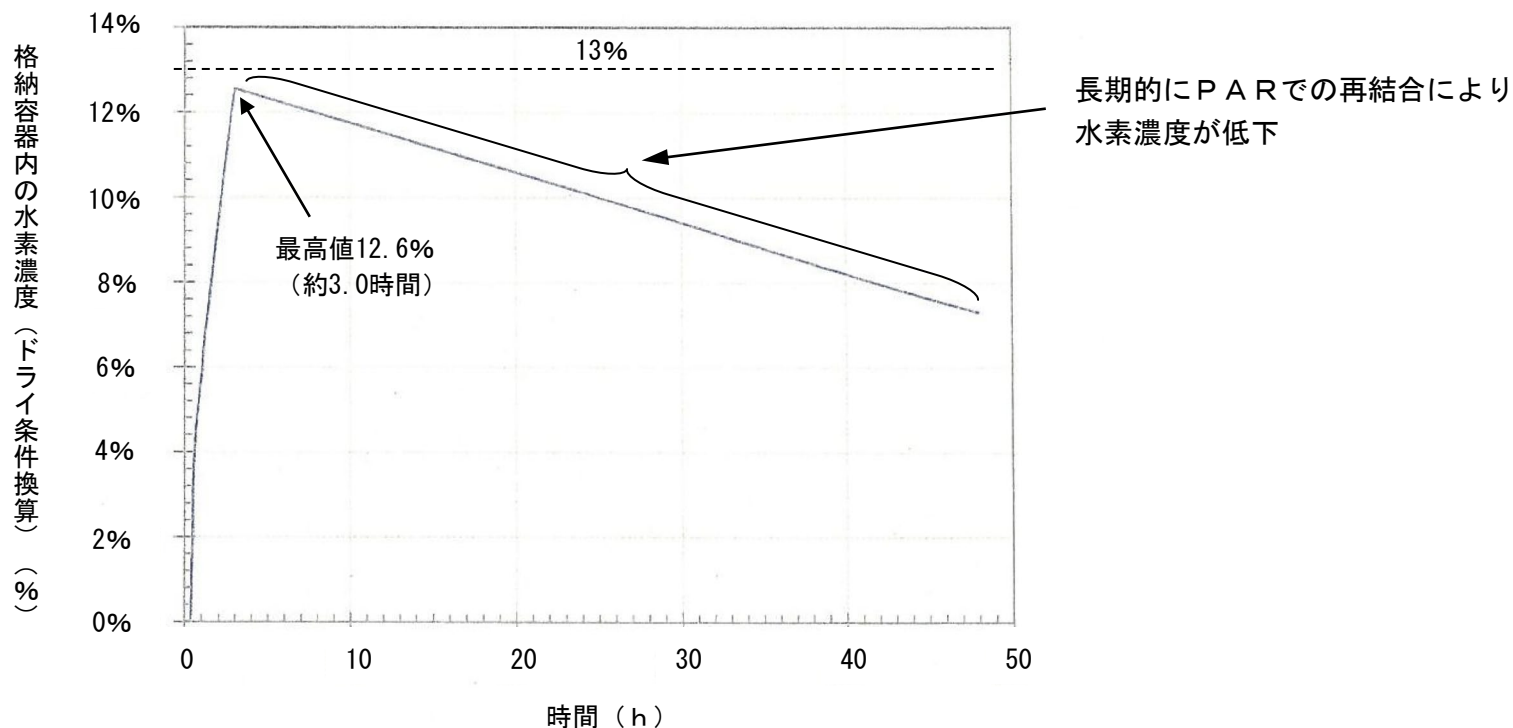


MCCIに伴う水素の追加発生も含めた上で、次頁「(2) 水素発生量の不確かさ」の中で水素濃度への影響を評価

（2）水素発生量の不確かさ

炉心損傷時の水素発生量の不確かさを考慮し、「水素燃焼」の評価事故シーケンスにおいて「（1）のMCCIの不確かさ」に伴う水素の追加発生を含め、保守的に炉心損傷時に全炉心Zrの100%が水と反応するとした場合の原子炉格納容器内の水素濃度評価を実施。

その結果、第4図のとおりMCCIの不確かさを考慮した場合でも格納容器内ドライ換算水素濃度が13vol%に到達することはないことを確認。



第4図 格納容器内の全体平均水素濃度の推移（GOTHIC）〔全炉心Zr100%反応、PAR5台〕

（3）CV内の水素混合に関する不確かさ（イグナイタの追加設置）

「（2）水素発生量の不確かさ」において、炉心損傷時にMCCIの不確かさを考慮した場合、PARのみで判断基準を満足することを確認しているが、水素発生量やCV内での水素拡散混合に関する不確かさを考慮し、PARに加え、電気式水素燃焼装置（イグナイタ）を追加設置。

イグナイタは当初は自主設備としての位置付けで設置することを考えていたが、上記不確かさを考慮し、SA設備として登録することへ変更。

○イグナイタの設置場所

- ・炉心損傷時に発生する水素が放出される位置とその後の通過経路を推定して設置し、発生した水素を確実に処理。

イグナイタ設置場所	水素放出等の想定			設置個数
	放出	隣接部又は通過経路	想定事項	
加圧器逃がしタンク近傍	○		加圧器逃がしタンクラプチャーディスクからの水素放出	1個
ループ基礎室及びループ基礎室外周部		○	加圧器逃がしタンク近傍からの水素の流入	3個
加圧器室	○		加圧器室内の破断口からの水素放出	1個
加圧器室外上部		○	加圧器室からの水素の流入 上部ドーム部への万一の水素蓄積	1個
各ループ室	○		RCS配管の破断口からの水素放出	3個
ICISシンブル配管室入口扉近傍	○	○	ICISシンブル配管室入口扉からの水素放出 加圧器逃がしタンク近傍からの水素の流入	1個
ICISシンブル配管のCV一般部から ICISシンブル配管室への床貫通部近傍	○		ICISコンジット床面貫通部からの水素放出	1個

○イグナイタの原子炉格納容器上部への追加設置

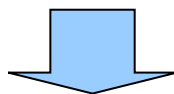
原子炉格納容器内の水素混合

重大事故時に発生する水素の混合挙動については、下表のとおり原子炉格納容器内全体での大きな循環流が形成されるため、濃度成層化が起こる可能性は小さいと考えられる。

水素混合の要素	効果	備考
①格納容器スプレイによる混合	格納容器スプレイ又は自然対流冷却の単独の対策で原子炉格納容器全体が混合	NUPEC 報告(H15) * 1、有効性評価
②格納容器内自然対流冷却による混合		JNES 解析(H18) * 2
③PARによる発熱による流体の上昇流	混合に寄与	
④熔融炉心の原子炉下部キャビティ落下後の発生蒸気による上昇流	加圧器気相部破断以外のケースでは、蒸気流によって原子炉格納容器全体が混合	NUPEC 報告(H15) * 1
⑤蒸気発生器からの放熱等による上昇流	混合に寄与	

* 1 重要構造物安全評価（原子炉格納容器信頼性実証事業）に関する総括報告書（平成15年8月）

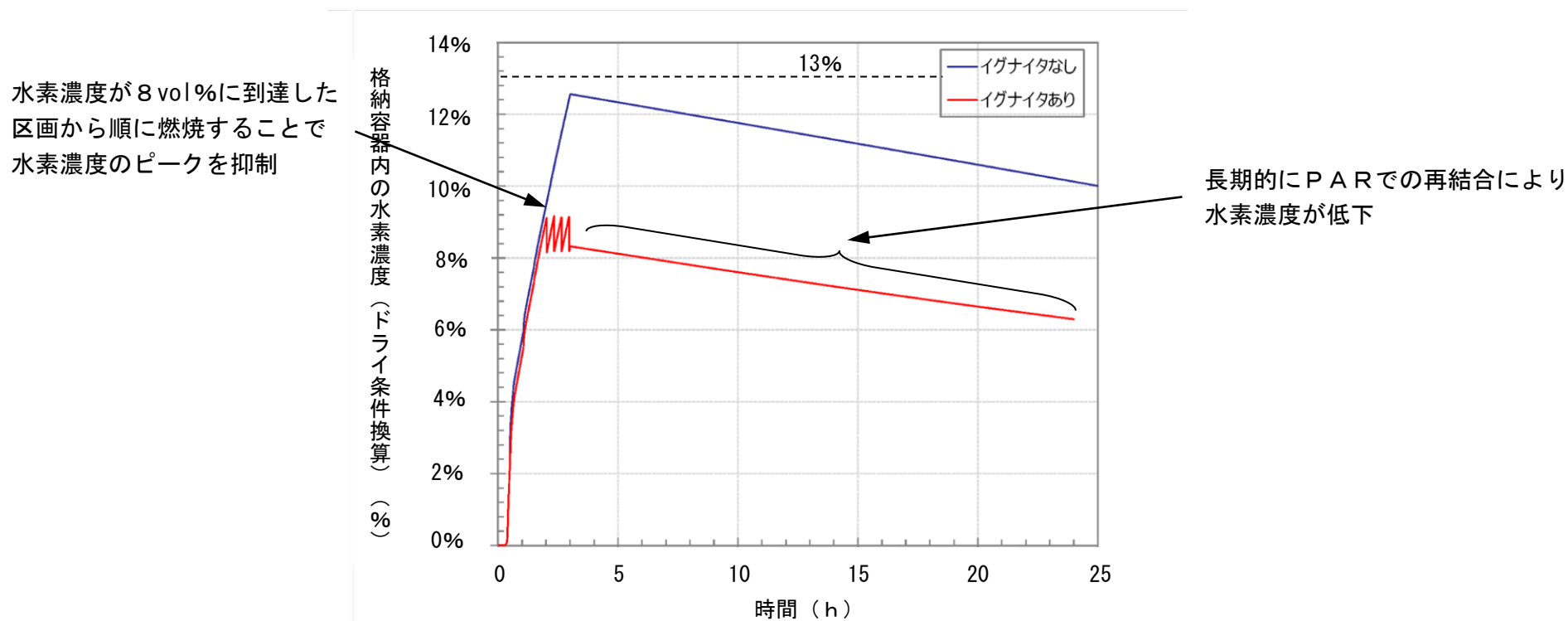
* 2 アクシデントマネジメント知識ベースに関する報告書（平成18年8月）



仮にイグナイタによっても処理できず、原子炉格納容器ドーム部に流入して頂部付近に滞留又は成層化する不確かさも考慮して、早期段階から水素を確実に処理できるよう、更なる安全性の向上を目的にイグナイタを原子炉格納容器ドーム部頂部付近に2個（うち1個予備）追加設置。

○イグナイタ設置による水素濃度低減効果

- ・ G O T H I Cにおける原子炉格納容器内のノード分割を踏まえ、P A R 5基、イグナイタ12個を設置し、設置位置に対応したノードにおいて水素除去が行われるようにモデル化して水素濃度評価を実施。なお、イグナイタはウェット水素濃度8 vol%で着火するとして評価。
- ・ 第5図のとおり、イグナイタにより初期に原子炉格納容器内に大量発生する水素濃度のピークを抑える効果があることを確認。



第5図 格納容器内の全体平均水素濃度の推移（G O T H I C）〔全炉心Z r 100%反応、P A R 5台、イグナイタ12個〕

- 有効性評価は、裸のPRAの結果をもとに評価事故シーケンスを選定し、評価では保守的な条件設定や感度解析を実施して、SA対策が有効であることを確認。

- 「水素燃焼」のSA対策の有効性評価では、
 - ・保守的な条件設定（75%Zr-水反応）や感度解析（MCCIの不確かさ、水素発生量の不確かさ、CV内水素混合の不確かさ）を実施して、SA対策が有効であることを確認。
 - ・なお、SA対策としてPAR及びイグナイタを設置しているが、ベースケース評価ではPARのみで判断基準を満足することを確認。
 - ・イグナイタはCV内に水素が拡散する前に処理できるように配置しているが、仮に処理できずCVドーム部で成層化することを考慮して、CVドーム部にも追加で設置。感度解析ではPARに加えイグナイタの効果を検討して、判断基準を満足することを確認。
 - ・また、SA対策に加え特定重大事故等対処施設としての水素濃度低減設備も新たに設置しており、更に水素濃度低減が可能。

- SA事象は、物理現象や解析手法（コード）の不確かさが大きいいため、現状では、これらを踏まえた条件設定や感度解析が必要な状況。今後、これらが精緻化されると設備の合理化や対策要員の見直しなどが可能となり、設備面・運用面での発電所員の負担等の軽減につながり、それらを更なる安全性向上のためのリソースとして使用することが期待される。